

Projet Télécom/Signal

Étude d'une chaîne de transmission sur porteuse pour une transmission satellite fixe

Première année - Département Sciences du numérique

2023-2024

1 Introduction

Le DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) est une norme ETSI (European Telecommunication Standard Institute) pour la diffusion de flux numériques multimédias (son, vidéo, données) en utilisant un lien satellite. La première version a été publiée en 1994 et se base sur un modulateur QPSK avec une mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off égal à 0.35. Une deuxième version (DVB-S2), parue en 2005, propose la possibilité d'utiliser un modulateur 8-PSK avec une mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off égal à 0.2 (plusieurs modulateurs sont définis dans cette deuxième version).

Via l'implantation et l'étude de ces modulateurs, l'objectif de ce travail va être de vous initier à l'étude de chaînes de transmission sur fréquence porteuse :

- Rôle des différents éléments,
- Implantation, utilisation, intérêt de la chaîne passe-bas équivalente,
- Comparaison de chaînes de transmission sur fréquence porteuse en termes d'efficacité spectrale et d'efficacité en puissance,
- Identification des éléments ayant une influence sur l'efficacité spectrale et l'efficacité en puissance dans une transmission avec transposition de fréquence.

Il sera également l'occasion d'utiliser des outils de traitement numérique du signal pour :

- Générer des signaux numériques,
- Estimer et tracer des densités spectrales de puissance,
- Implanter et utiliser des filtres à réponses impulsionnelles finies.

2 Implantation d'une transmission avec transposition de fréquence

On plantera, dans un premier temps, une transmission au format DVB-S, avec mapping QPSK, filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé de roll off 0.35 et transposition de fréquence.

On utilisera une fréquence d'échantillonnage $F_e = 24$ kHz pour transmettre un débit binaire $R_b = 3$ kbps et une fréquence porteuse f_p de 2 kHz.

Le canal satellite pour une transmission fixe de type DVB est un canal de propagation à bruit additif et Gaussien (canal AWGN : Additive White Gaussian Noise). Le bruit sera introduit dans votre simulation sur la bande F_e , grâce à la fonction `randn` de matlab, avec une puissance σ_n^2 qui sera déterminée en fonction du rapport signal à bruit par bit souhaité à l'entrée du récepteur, $\frac{E_b}{N_0}$, de la manière suivante (voir démonstration en annexe) :

$$\sigma_n^2 = \frac{P_x N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}},$$

où M représente l'ordre de la modulation, N_s le facteur de suréchantillonnage et P_x la puissance du signal à bruite (en sortie du modulateur).

Le démodulateur devra être implanté de manière optimale : Respect du critère de Nyquist, Filtrage adapté, Instants optimaux d'échantillonnage, Détecteur à seuil avec seuil optimaux, Demapping adapté au mapping utilisé.

A partir de la chaine de transmission implantée, les éléments suivants devront figurer dans votre rapport :

1. Tracé des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature avec une échelle temporelle correcte.
2. Tracé du signal transmis sur fréquence porteuse avec une échelle temporelle correcte.
3. Tracé de la densité spectrale de puissance du signal transmis sur fréquence porteuse.
4. Explication du tracé observé pour la DSP (forme, position) en vous référant à la théorie.
5. Tracé du taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur pour des valeurs allant de 0 à 6 dB.
6. Comparaison du TEB simulé avec le TEB théorique de la chaine étudiée (tracé superposés sur une même figure). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaine de transmission.

3 Implantation de la chaine passe-bas équivalente à la chaine de transmission sur porteuse précédente

On implantera ici la chaine de transmission passe-bas équivalente à la chaine de transmission sur fréquence porteuse réalisée précédemment, avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 6$ kHz pour transmettre un débit binaire $R_b = 3$ kbps.

Le bruit, introduit par le canal passe-bas équivalent au canal de propagation, est un bruit complexe $n_e(t) = n_I(t) + jn_Q(t)$. Il viendra s'ajouter, dans vos simulation, sur la bande F_e avec une même puissance sur chaque voie ($\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2$), puissance que l'on calculera en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur E_b/N_0 souhaité de la manière suivante (démonstration en annexe) :

$$\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2 = \frac{P_{x_e} N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}},$$

où M représente l'ordre de la modulation, N_s le facteur de suréchantillonnage et P_{x_e} la puissance de l'enveloppe complexe associée au signal à bruite (en sortie du modulateur).

A partir de la chaine de transmission implantée, les éléments suivants devront figurer dans votre rapport :

1. Tracé des signaux générés sur les voies en phase et en quadrature avec une échelle temporelle correcte.
2. Tracé de la densité spectrale de puissance de l'enveloppe complexe associée au signal transmis sur fréquence porteuse.
3. Explication du tracé de la DSP observée (forme, position) en vous référant à la théorie. On comparera notamment ce tracé avec celui obtenu précédemment pour la DSP du signal sur fréquence porteuse.
4. Tracé des constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 , et explication des différences observées.
5. Tracé du taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur pour des valeurs allant de 0 à 6 dB.
6. Comparaison de ce TEB avec celui obtenu précédemment sur la chaine implantée avec transposition de fréquence. Les deux tracés doivent se superposer. Quel peut donc être l'intérêt d'implanter la chaine passe-bas équivalente plutôt que la chaine de transmission avec transposition de fréquence ? Expliquez votre réponse.

4 Comparaison du modulateur DVS-S avec un modulateur 4-ASK

Nous allons vous demander ici de comparer le modulateur proposé par le DVB-S (Mapping QPSK, filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec roll off de 0.35) avec un modulateur de type 4-ASK utilisant le même filtre de mise en forme. Vous utiliserez, pour cela, les chaînes passe-bas équivalentes associées, avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 6$ kHz pour transmettre un débit binaire $R_b = 3$ kbps.

4.1 Implantation de la modulation 4-ASK

Implantez la chaîne complète optimale et, à partir de la chaîne de transmission implantée, les éléments suivants devront figurer dans votre rapport :

1. Tracé des constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 , avec explication des différences observées.
2. Tracé du taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
3. Comparaison du TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée (tracé superposés sur une même figure). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaîne de transmission. Le TEB théorique utilisé devra être donné dans votre rapport.

Remarque : Vous pouvez utiliser les fonctions *pammod.m*, et *pamdemod.m* de Matlab afin de réaliser le mapping et le demapping 4-ASK.

4.2 Comparaison du modulateur QPSK du DVB-S avec le modulateur 4-ASK

Les éléments suivants devront figurer dans votre rapport :

1. Comparaison et classement des deux modulateurs en termes d'efficacité en puissance.
2. Comparaison et classement des deux modulateurs en termes d'efficacité spectrale.
3. Identification de l'intérêt d'utiliser une modulation QPSK dans le DVB-S plutôt qu'une 4-ASK.

Les tracés permettant de valider vos comparaisons et classements devront, bien entendu, figurer dans votre rapport, avec les explications associées.

5 Comparaison du modulateur DVS-S avec un des modulateurs proposés par le DVB-S2

Nous allons vous demander ici de comparer le modulateur DVB-S (Mapping QPSK, filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec roll off de 0.35) à un des modulateurs proposés dans le DVB-S2 : mapping 8-PSK et filtre de mise en forme en racine de cosinus surélevé avec roll off égal à 0.20. Vous utiliserez, pour cela, les chaînes passe-bas équivalentes associées, avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 6$ kHz pour transmettre un débit binaire $R_b = 3$ kbps.

5.1 Implantation de la modulation DVB-S2

Implantez la chaîne complète optimale et, à partir de la chaîne de transmission implantée, les éléments suivants devront figurer dans votre rapport :

1. Tracé des constellations en sortie du mapping et en sortie de l'échantillonneur pour différentes valeurs de E_b/N_0 , avec explication des différences observées.
2. Tracé du taux d'erreur binaire obtenu en fonction du rapport signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur (E_b/N_0) en décibels. On prendra des valeurs de $(E_b/N_0)_{dB}$ allant de 0 à 6 dB.
3. Comparaison du TEB simulé au TEB théorique de la chaîne étudiée (tracé superposés sur une même figure). Ce tracé doit permettre de valider le bon fonctionnement de votre chaîne de transmission. Le TEB théorique utilisé devra être donné dans votre rapport.

Remarque : Vous pouvez utiliser les fonctions *pskmod.m*, et *pskdemod.m* de Matlab afin de réaliser le mapping et le demapping 8-PSK.

5.2 Comparaison des modulateurs DVB-S et DVB-S2

Les éléments suivants devront figurer dans votre rapport :

1. Comparaison et classement des deux modulateurs en termes d'efficacité en puissance.
2. Comparaison et classement des des deux modulateurs en termes d'efficacité spectrale.
3. Identification des avantages et inconvénients à utiliser de nouvelles modulations, type 8-PSK, et de nouvelles valeurs de roll-off dans les nouvelles versions du DVB-S (DVB-S2 mais ensuite DVB-S2X).

Les tracés permettant de valider vos comparaisons et classements devront, bien entendu, figurer dans votre rapport, avec les explications associées.

6 Annexes

6.1 Puissance de bruit à introduire dans les chaines de transmission

6.1.1 Chaîne de transmission sur porteuse

On introduit un bruit réel de densité spectrale de puissance $N_0/2$ dans la bande F_e . La variance du bruit à introduire est donc donnée par :

$$\sigma_n^2 = \frac{N_0}{2} F_e = \frac{E_s}{2 \frac{E_s}{N_0}} F_e = \frac{P_x T_s}{2 \frac{E_s}{N_0}} F_e = \frac{P_x N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}},$$

où

- E_s représente l'énergie par symbole à l'entrée du récepteur : $E_s = \log_2(M) E_b$, si E_b représente l'énergie binaire à l'entrée du récepteur et M l'ordre de la modulation,
- T_s représente la durée symbole,
- N_s représente le facteur de suréchantillonnage : $T_s = N_s T_e$, $T_e = 1/F_e$ étant la période d'échantillonnage
- P_x représente la puissance du signal à bruite (signal en sortie du modulateur).

6.1.2 Chaîne de transmission passe-bas équivalente à la chaîne de transmission sur fréquence porteuse

On ajoute, à l'enveloppe complexe $x_e(t)$ associée au signal modulé sur porteuse $x(t)$, un bruit complexe $n_e(t) = n_I(t) + j n_Q(t)$ (voir figure ??). Il viendra s'ajouter sur la bande F_e avec une même puissance sur chaque voie ($\sigma_{n_I}^2 = \sigma_{n_Q}^2$), puissance que l'on calculera en fonction des rapports signal à bruit par bit à l'entrée du récepteur E_b/N_0 souhaités de la manière suivante :

$$\sigma_I^2 = \sigma_Q^2 = N_0 F_e = \frac{E_s}{\frac{E_s}{N_0}} F_e = \frac{P_x T_s}{\frac{E_s}{N_0}} F_e = \frac{P_{x_e} T_s}{2 \frac{E_s}{N_0}} F_e = \frac{P_{x_e} N_s}{2 \log_2(M) \frac{E_b}{N_0}},$$

où

- E_s représente l'énergie par symbole à l'entrée du récepteur : $E_s = \log_2(M) E_b$, si E_b représente l'énergie binaire à l'entrée du récepteur et M l'ordre de la modulation,
- T_s représente la durée symbole,
- N_s représente le facteur de suréchantillonnage : $T_s = N_s T_e$, $T_e = 1/F_e$ étant la période d'échantillonnage
- P_{x_e} représente la puissance de l'enveloppe complexe associée au signal sur porteuse : $P_{x_e} = \frac{P_x}{2}$, si P_x représente la puissance du signal sur porteuse.

6.2 Précision sur les mesures de TEB

Le TEB peut être modélisé par une somme de variables aléatoires X_k prenant leurs valeurs dans l'ensemble $\{0, 1\}$ avec les probabilités $P[X_k = 0] = 1 - p$ (pas d'erreur) et $P[X_k = 1] = p$ (erreur) :

$$TEB = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k.$$

L'erreur quadratique relative sur le TEB est donnée par :

$$\epsilon^2 = \frac{\sigma_{TEB}^2}{m_{TEB}^2},$$

où m_{TEB} et σ_{TEB}^2 représentent, respectivement, la moyenne et la variance sur l'estimation du TEB. La précision sur les mesures de TEB sera donnée par ϵ . On peut écrire :

$$m_{TEB} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E[X_k] = \frac{1}{N} N (1 \times p + 0 \times (1 - p)) = p$$

et

$$\sigma_{TEB}^2 = E \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \right)^2 \right] - p^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N E[X_k X_i] - p^2$$

- si $k = i$ (N cas) alors $E[X_k^2] = 1^2 \times p + 0^2 \times (1 - p) = p$
- si $k \neq i$ ($N^2 - N$ cas) alors $E[X_k X_i] = E[X_k] E[X_i] = p^2$

D'où :

$$\sigma_{TEB}^2 = \frac{1}{N^2} \{Np + (N^2 - N)p^2\} - p^2 = \frac{p(1-p)}{N}$$

On constate que la variance de l'erreur tend vers 0 quand N augmente et on peut écrire l'erreur quadratique relative sur le TEB de la manière suivante :

$$\epsilon^2 = \frac{\sigma_{TEB}^2}{m_{TEB}^2} = \frac{1-p}{Np} \simeq \frac{1}{Np} \text{ pour } p \ll 1$$

On obtient alors :

- le nombre d'élément binaire à générer, N , de manière à obtenir une précision ϵ fixée sur la mesure d'un TEB dont la valeur est, a priori, connue. Par exemple, si on veut mesurer un TEB de 10^{-2} avec une précision de 10%, il faudra générer $N = \frac{1}{10^{-2} \times (10^{-1})^2} = 10^4$ bits.
- le nombre de simulations à réaliser si la valeur à mesurer pour le TEB n'est pas, a priori, connue. On fera alors des simulations jusqu'à observer $1/\epsilon^2$ erreurs pour obtenir une mesure avec une précision ϵ fixée. Par exemple, si on veut mesurer le TEB avec une précision $\epsilon = 10\%$, il faudra compter les erreurs jusqu'à en obtenir $1/\epsilon^2 = 10^2$ avant de considérer la mesure de TEB obtenue comme disposant de la précision requise.